教与学的大脑：人际神经科学助推教育研究

成晓君[1]，刘美焕[1]，潘亚峰[2]，李红[1*]

1 深圳大学心理学院，深圳，中国

2 卡罗琳斯卡医学院临床神经科学系，斯德哥尔摩，瑞典

摘要 如何从生理层面刻画教育活动的人际互动模式和动态性是教育神经科学面临的一个重要挑战。人际神经科学视角为其提供了可能的解决途径；这一新兴的视角通过记录和分析进行同一认知活动时两人或多人大脑活动之间的关联，来揭示大脑活动的群体模式。目前，人际神经科学方法已被应用于教育研究，例如监控教学过程、预测教学效果和识别教学影响因素，相应的研究成果对教育活动具有重要启示。未来的研究者可以更多地关注不同学习水平的学生大脑的互动机制及人际神经科学方法应用于技能教学及线上教学评估的巨大潜力。

关键词 人际神经科学，教育，超扫描，脑间活动同步性，被试间相关性

1 引言

教育是一种广泛存在于人类社会的活动，其目的在于培养人才。迄今为止，虽然教育研究者总结出了大量的教育规律，但这些规律大多基于经验、调查或质性研究范式；这些传统的范式和方法通常不具有即时性，且或带有一定的主观性，或需花费大量的时间、精力(乔新虹 等, 2018; Dahlstrom-Hakki et al., 2019)。近几十年来，随着电生理（脑电图，Electroencephalogram/EEG）和神经影像学（功能磁共振成像，functional Magnetic Resonance Imaging/fMRI；功能近红外成像，function near-infrared spectroscopy/fNIRS）技术的发展，越来越多的研究者开始使用认知神经工具来研究教育活动，教育神经科学应运而生。通过在实验室中模拟教学活动并对教师或学生的大脑活动进行直接的观察，既减少了对教学本身的干涉，又提供了相对客观的指标，使其在获得更多的、更直接的学习研究结论方面显示出巨大的优势(乔新虹 等, 2018; Dahlstrom-Hakki et al., 2019; Wazny & Nathan-Roberts, 2018)。

然而，尽管教育神经科学以其独特的研究视角和科学的研究思路为教育提供了客观、

收稿日期：2020-11-06
基金号：国家自然科学基金（31800951），深圳大学“教学新秀”精进计划（高水平大学二期建设860-000001020620）
*通讯作者：李红,Email: lihongszu@szu.edu.cn

可重复的生理证据，但大多数的研究只在严格控制的实验室中使用简单的刺激进行(Gilbert et al., 2014; Ruge & Wolfensteller, 2009)，且只侧重教师或者学生（即单个个体）的行为与脑活动(Babiker et al., 2019; Ko et al., 2017)。而实际上，教学过程中存在着大量的教师与学生的互动（“师生互动”）以及学生与学生的互动（“生生互动”），这些互动是动态的(霍鹏飞, 吴玮, 2011; Watanabe et al., 2013)，且在相当大的程度上影响着教育活动的效果(Holper et al., 2013; Liu et al., 2019; Paechter & Maier, 2010)。因此，传统的教育神经科学研究面临着巨大的挑战，即如何从群体层面刻画师生或生生之间的这种动态的行为模式和大脑活动模式。值得注意的是，近年来脑科学领域开始在高自然生态情境中研究社会互动过程中的大脑活动，并尝试对多名个体的大脑活动进行关注。这种方式被称为“人际神经科学”（interpersonal neuroscience）(Konvalinka & Roepstorff, 2012; Schilbach et al., 2013)。人际神经科学，指的是通过记录双人或多人在进行同一认知活动时的脑活动，来揭示群体神经活动模式(乔新虹 等, 2018; Konvalinka & Roepstorff, 2012; Schilbach et al., 2013; Wazny & Nathan-Roberts, 2018; Yasuyo et al., 2018)。因此，与传统的神经科学相比，人际神经科学有两个要点：1）关注的活动涉及到两人或多人，2）关注的神经活动模式为群体模式而非单脑激活模式。这一视角给教育研究带来了新的契机。近期，研究者们通过观察教学活动中大脑活动的群体模式，探究了教师与学生（或学生之间）在生理层面产生的联结，从而更全面客观地揭示教学过程中的师生交互现象的实质，为教育的有效性提供有力的科学依据(乔新虹 等, 2018; Wazny & Nathan-Roberts, 2018; Yasuyo et al., 2018)。本文将介绍人际神经科学的方法，阐述其在教育研究领域的有效应用以及相应研究成果对教育活动的启示，并讨论其优劣势和未来展望。

2 人际神经科学的方法

如前所述，人际神经科学这一视角主要关注涉及到多人的活动，并注重考察大脑活动的群体模式。从这一理念出发，研究者们开发了多种范式来达到相应的目的。这些范式根据扫描方式的特点可以归结为两类：序列扫描（sequential scanning）研究和同时扫描（concurrent scanning）研究（见图 1）。这两类研究有其各自的应用场景，序列扫描研究侧重考查群体对信息的加工模式以及这些信息在人际间的传递(Schippers et al., 2011；Zhu et al., 2019)，而同时扫描研究则侧重考查自然情境下多个个体的互动模式(例如，Dikker et al., 2017; Holper et al., 2013)。这两类研究可互为补充，共同促进的教育研究的发展。

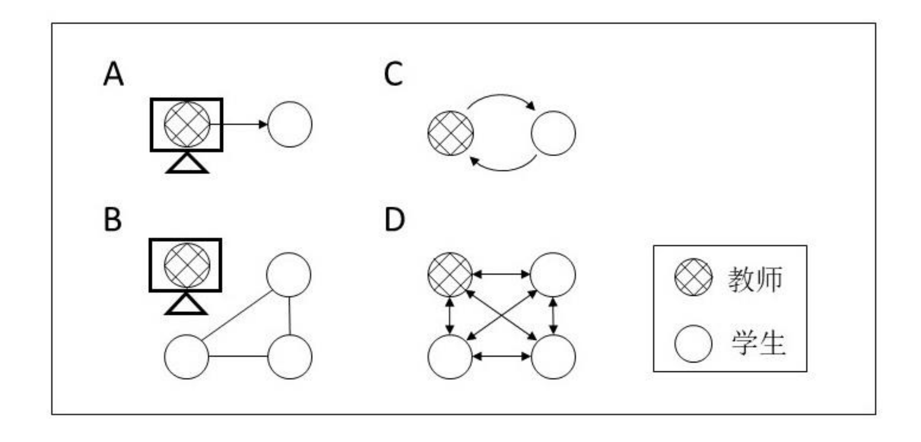


图 1. 人际神经科学视角下的扫描模型：序列扫描（A 和 B）和同时扫描（C 和 D）。（A）先对进行任务的教师进行扫描，而后对观看教学视频的学生进行扫描，考察教师的大脑活动是否可预测学生的大脑活动；（B）对接受同一刺激（如教学视频）的多个学生进行分别扫描，考察学生之间大脑活动的相关性；（C）同时扫描一对一教学模式中的教师和学生，考察师生的脑间同步；（D）同时扫描一对多教学模式中的教师和学生，考察师生的脑间同步和生生的脑间同步；

2.1 序列扫描研究

序列扫描研究，即分别记录多个个体在进行同一认知活动时的大脑活动，并考察这些大脑活动之间的关联。尽管从记录方式上看，这类研究属于“单脑”记录，但与传统单脑研究关注特定脑区的激活不同, 它考察的是大脑活动的群体模式，因此仍可以将其纳入人际神经科学的范畴。

在序列扫描中，较为典型的研究范式为 “发送者-接收者”模式（见图 1A）(Anders et al., 2011; Schippers et al., 2010)。在这一范式下，研究者先让作为信息发送者的被试在进行相应的任务（例如用一些姿势动作来传达某一特定信息，这一过程将会被录像），而后将发送者的录像播放给作为接收者的个体观看，并让其进行相应的任务（例如猜测发送者的姿势所包含的信息）。研究者将分别记录发送者和接收者在进行任务时的大脑活动。由于在这类范式中，“互动”的两个或多个个体在任务上具有时间上的先后，研究者们通常会考察大脑活动信号的方向性，即发送者的大脑活动是否可以预测接收者的大脑活动。考察的方法包括时域上的格兰杰因果分析（Granger Causality analysis，GCA）(Granger, 1969; Holper et al., 2012; Jiang et al., 2015; Pan et al., 2017) 和频域上的偏定向相关分析（Partial directed coherence，PDC）(Baccala & Sameshima, 2001)等。

此外，研究者们还尝试分别记录多个个体在进行同一认知活动（例如观看教学视频等）时的大脑活动，并考察所有个体（即群体）的大脑活动相关性（Inter-subject correlation/ISC，

见图 1B）(Cohen et al., 2018; Dmochowski et al., 2014; Zhu et al., 2019)。具体地，研究者们从群体的角度发出，发展了相关成分分析（Correlated Components Analysis, CorrCA）方法和神经相似性分析方法（Neural Reliability computation）。相关成分分析方法是由 Dmochowski 等人 (2012)提出的一种数据驱动的方法，主要被用来决定哪一个成分对个体之间的相关性提供的信息最多，并试图找到一组投射向量，使经历相同刺激的个体的神经活动之间的相关性最大化。神经相似性分析方法则是相关成分分析的一种变形，它将所有参与者的数据投射到一个普通空间中,使得投射结果在被试群体中表现出最大的被试间相关(Dmochowski et al., 2014)。这两种方法均可以用于分析两名或者多名参与者之间神经活动模式的相似性(Cohen et al., 2018; Dmochowski et al., 2014 ; Poulsen et al., 2017)。

值得注意的是，将一个两人或多人的互动任务拆成两个分任务进行序列扫描的“发送者-接收者”模式常见于社会互动研究的发展早期，是研究者们试图尝试从人际的视角对信息/知识的传递进行研究，但受限于技术或资源，无法开展同时扫描多人在互动情景中的大脑活动时所采取的一种“折中”方式(Anders et al., 2011; Schippers et al., 2011)。目前，随着同时扫描技术的发展，“发送者-接收者”模式的序列扫描已不多见，但在一些特殊领域（例如联合注意）这一扫描方式仍具有其生命力。考察多个个体在经历同一刺激或事件时的大脑活动的相关性，目前则被运用在教学材料评估和监控教学过程中(Cohen et al., 2018; Zhu et al., 2019)，下文将有具体的介绍。

2.2 同时扫描研究

同时扫描研究，即超扫描（hyperscanning）研究，指的是同时记录处于互动过程中（例如教学活动、团队合作等）的多个个体的大脑活动，并考察分析互动个体大脑活动之间的关联。目前，超扫描的方法可以依赖 EEG、fMRI 以及 fNIRS 等不同的测量技术。每种技术的优劣则主要受制于自身的特点。目前，由于 fMRI 设备空间所限，无法较好地适用于多人的自然交互场景，其在教育研究领域的应用较少；基于更为便携的 EEG 和 fNIRS 设备的超扫描技术则已被广泛应用到教学活动研究中(Bevilacqua et al., 2018; Dikker et al., 2017; Holper et al., 2013; Nozawa et al., 2019; Pan et al., 2018; Takeuchi et al., 2017; Zheng et al., 2020; Zheng et al., 2018)。

超扫描技术下，研究者们主要考察互动个体的大脑活动的同步性（即“脑间同步”，Interpersonal Brain Synchronization，IBS），具体为在脑信号的激活水平、成分、时间、空间、

频率、相位等维度上计算个体间的大脑活动的变化关联性(李先春, 2018)。比较常用的方法有关注时域的皮尔逊相关（Pearson Correlation Coefficient）(Holper et al., 2013; Takeuchi et al., 2017)和交叉相关（Cross Correlation analysis，CCorrA）(Burgess, 2013; Davidesco et al., 2019)，关注频域的总体相互依赖水平（Total Interdependence measurements，TI）(Bevilacqua et al., 2018; Dikker et al., 2017)、小波变换相干性（Wavelet Transform Coherence，WTC）(Torrence & Compo, 1997; Jiang et al., 2015; Liu et al., 2016; Pan et al., 2018)和相位锁定值（Phase locking value，PLV）(Jahng et al., 2017; Lachaux et al., 1999)等。此外，研究者们亦会运用 GCA 等方法来考察互动个体间大脑活动信号的方向性(Holper et al., 2012; Jiang et al., 2015; Pan et al., 2017)。

与序列扫描相比，超扫描具备了更高的生态效度，其应用的场景亦更为广泛。目前，超扫描技术已经被用于实验室的“一对一”模拟教学场景中（见图 1C），揭示了师生互动的行为和脑基础(Holper et al., 2013; Pan et al., 2018; Sun et al., 2019; Zheng et al., 2018)；更进一步地，研究者们还将其应用于真实课堂的“一对多”教学场景中（见图 1D），揭示了教学过程中师生和生生的行为和大脑活动关联的动态性(Bevilacqua et al., 2019; Dikker et al., 2017; Davidesco et al., 2019) 。目前，这一扫描方式受到科研工作者和教育工作者的共同关注。

3 人际神经科学在教育研究中的有效应用

运用超扫描等技术，研究者们发现教学活动可诱发明显的师生/生生的脑间同步，且教学过程中不同阶段/场景的脑间同步特点可以反映教学过程的动态性(Holper et al., 2013; Nozawa et al., 2019; Pan et al., 2018; Takeuchi et al., 2017)；同时，学生群体的大脑活动相关性可以反映其在学习过程中的认知状态(Cohen et al., 2018; Poulsen et al., 2017; Zhu et al., 2019)。这表明了人际神经科学视角可以帮助研究者们更好地理解教育教学过程。到目前为止，研究者们已经利用人际神经科学技术方法对教学过程进行监控，对教学效果进行预测，并对可能影响教学活动的要素进行捕捉。

3.1 监控教学过程

学生在课堂上是否专注地投入到学习中，在很大程度上决定了其是否能学习到知识。因此，对教学过程中的学生的学习投入度进行直接客观的监控和预测显得尤为重要(Wazny & Nathan-Roberts, 2018)。

有研究表明，群体的大脑活动相关性（即 ISC）可以预测群体对同一电视节目接受度和观看时投入度(Dmochowski et al., 2014)。这一发现启发了教育研究工作者使用 ISC 这一指标来评估学生对学习材料的共同注意投入和兴趣(Cohen et al., 2018; Poulsen et al., 2017; Zhu et al., 2019)。例如，Poulsen 等人(2017)使用便携式脑电设备，在真实课堂中对多名学生观看教学视频时的大脑活动进行了同步记录，结果发现，观看那些令人印象深刻（根据学生的主观报告）的视频片段时，学生群体具有更高的 ISC(Poulsen et al., 2017)，且这一 ISC 的程度可以成功区分学生观看视频时的注意状态（有意学习/无意学习）(Cohen et al., 2018)。进一步地，研究者们记录了师生在一个学期的正常生物课程中的大脑活动，发现学生的脑间同步可以预测学生的课堂投入度(Dikker et al., 2017 ; Bevilacqua et al., 2018)，且师生的脑间同步比生生的脑间同步能更好地预测学生的每日课程投入度(Bevilacqua et al., 2018)。这些结果都表明，大脑活动的群体模式（例如 ISC、脑间同步）可以作为监控教学过程中学生的注意投入水平的一个神经标志。

此外，大脑活动的群体模式还可以反映当前教学活动的师生关系(Bevilacqua et al., 2018；Nozawa et al., 2019)。例如，研究者们发现师生的脑间同步程度越高，师生的关系融洽程度的越高(Nozawa et al., 2019)。当经过一个教学过程，师生的脑间同步得到提升时，师生的情感联结也随之增强 (Zheng et al., 2020)。在课堂上，当学生们对老师的喜爱程度越高时，在不同的授课形式下，生生的脑间同步差异越小(Dikker et al., 2017)。

3.2 预测教学效果

教学的目的之一是进行知识的传递(Holper et al., 2013)。在传统的教育研究中，确认知识成功转移的方法主要是课后知识点检测，即测量学生对所教授的知识的理解与记忆的程度(Antonenko et al., 2010; Holper et al., 2013; Khader & Roesler, 2011)。但是，这种测量是终结性的，只能提供学生学习的最终状态。人际神经科学视角提供了一个新的途径：监测教学过程中师生大脑活动的关联。Holper 等人(2013)运用经典的师生互动模式“苏格拉底式对话”，第一次在教育领域使用了超扫描技术同时测量了互动过程中师生的大脑活动，并发现当成功地进行了知识传递时，学生的脑激活程度与老师的脑激活程度存在正相关，这表明师生的脑活动同步变化可以区分知识是否成功从教师传递给学生(Holper et al., 2013)。值得注意的是，这种同步变化的背后可能是教师和学生的左侧前额皮层激活水平的同步下降(Takeuchi et al., 2016)。由于前额皮层在社会互动中发挥着重要作用(Liu & Pelowski, 2014;

Cheng et al., 2015)，观察到的师生的前额皮层激活水平的下降可能代表了学生成功习得规则后社会互动需求的减少。这为师生间的脑间同步可以作为知识是否成功转移的指标提供了证据。进一步的研究发现，脑间同步不仅可以作为检验对知识的理解和记忆的神经标志，还可能比脑内活动这一指标更能准确地预测学生学习情况（即教学效果）。例如，Davidesco 等人(2019)发现，相比于个体脑内同步，个体的脑间同步能更有效地预测学生对知识的短时及长时记忆。生生脑间同步对长期记忆的预测是即时的，而师生的脑间同步对长期记忆的预测则是滞后的（大概为 200ms）(Davidesco et al., 2019)。这为教学有效性的评估提供了新的途径，激发了教育研究者通过对生生或师生的脑间同步反应进行记录来评估各种因素对教学效果的影响的研究，为思考如何提高教学质量提供了更直接、客观、丰富的过程信息。

3.3 追踪影响教学的要素

鉴于脑间同步可以反映教学过程且可能预测教学效果，研究者们将其作为有效教学的神经生理指标之一，用于探索各类可能影响教学的要素，并重点关注了教师的教学形式、教学方法，以及师生的个体差异。

在教学形式上，Bevilacqua 等人(2019)发现相比于讲授教学，视频教学（播放科普视频）条件下的测验成绩、生生脑间同步、师生脑间同步和学生课程投入度均较高。需指出的是，在 Bevilacqua 等人研究中采用的是教师讲授与科普短视频相交替(Bevilacqua et al., 2018)的方法，而讲授内容与视频内容具有连贯性，可以促进对视频内容的理解，这可能导致在视频教学中较高的生生脑间同步。此外，在视频教学中较高的生生脑间同步，一方面可能是由于对短视频的喜爱和投入导致的，另一方面也可能是由于共同接收了丰富的视觉刺激(Dmochowski et al., 2014)。与之相对地，Liu 等人(2019)发现在面对面的讲授教学（允许非语言反馈，如点头）时，学生的测试成绩、感知到的互动水平和左侧前额叶皮层(PFC)的任务相关脑同步水平显著高于以计算机为媒介的线上视频教学。这可能是因为面对面讲授教学即使没有明显的语言互动，也蕴含了大量即时性(Frymier & Houser, 2000; Miller et al., 2014)和丰富的非语言线索(Furnham & Chamorro-Premuzic, 2005)，教师可以根据学生的语言（问答）或非语言（如点头、皱眉）来调整教学节奏和内容，从而取得良好的教学效果。

除了教学形式，不同的教学方法的效果是教育研究工作中所关注的另一个焦点。Pan 等人(2018)采用了歌曲教唱的范式比较了“部分学习法”（即教师逐句教唱，学生逐句学习）和“整体学习法”(即教师向学习者表演整首歌曲后学生学习)这两种著名教学法的教学效果。结果表明，与整体学习法相比，使用部分学习法的师生具有更强的脑间同步，并且在教师教（即学生观察）的过程中的脑间同步可以预测学生的行为表现。这一结果支持了卷入理论(Astin, 1999)，即学生和教师之间的互动量是促进社会学习的关键因素(Pan et al., 2018)。进一步地，Pan 等人(2020)探讨了语言指导策略如何调节教学过程和效果。结果发现，接受支架式策略（即在教学过程中教师通过提问和提示的方法促进学生对知识的主动建构和理解）的学生比接受解释策略（即教师通过向学生解释每个概念，并给出相应的例子，帮助学生澄清信息）的学生在教学结束后保留了更多的学习内容。师生的脑间同步程度亦在教师使用支架策略时更高。这表明，提出关键问题和提供提示等建设性行为能促进教师与学习者之间的信息交流和知识转移，从而提高学习效果 (Pan et al., 2020)。当然，这并不代表解释策略是无效的，人们还是可以从解释策略中获益(Leinhardt & Steele, 2005; Chi et al., 2004)。

在教学过程中，师生的个体差异可能是影响教学效果的重要因素。对于学生而言，拥有与新内容相关的先验知识，才能更好地跟随教师的思路，在新知识和旧知识之间建立联系(Anderson, 1981)。新近的研究表明，只有在学生具备先前知识基础的情况下，相对于通过网络进行教学，面对面教学时的左侧前额叶皮层(PFC)的师生脑间同步水平更高，才能在教学过程的早期(进入教学任务 25~35 s 左右)预测教学效果(Liu et al., 2019)。同样地，Pan 等人(2020)等发现支架式策略只有在事先了解学生的知识基础的情况下师生脑间同步才会明显。这充分体现了基于学生先前知识水平进行教学的重要性。在了解到学生的差异后，是否能充分利用这种差异进行有效的教学考验着教师的教学能力，其中一个则是能否根据学生的差异调整教学行为。Sun 等人(2019)关注了专家/新手教师在合作能力的方面的差异，并发现专家教师-学生对的合作成绩高于新手教师-学生对。此外，在合作条件下，师生在左侧的背外侧前额叶皮层 (DLPFC)出现显著的任务相关脑间同步。进一步针对专家教师的相关分析表明任务相关的脑间同步与专家教师换位思考能力呈正相关，与专家教师-学生对的正确率呈正相关(Sun et al., 2019)。另外，在 Nozawa 等人(2019)的教学研究中，让一个没有教学经验的个体（本来是学生）扮演老师的角色来教另一个学生，结果发现先前的身体同步对单词记忆分数的并没有增强作用，研究者认为一个可能的原因是被试（新手）老师由于缺乏经验，严

格坚持给定的教学程序，不包括任何自己的发挥，即缺乏根据学生表现调整教学行为的能力(Nozawa et al., 2019)。这在一个侧面说明了老师的教学能力的个体差异对教学效果的影响，同时值得引起今后研究者在设计实验时的重视。

4 人际神经科学研究成果对教育的启示

由于人际神经科学视角（例如超扫描技术）在追踪教学过程和效果上的优势，研究者们对教学过程动态及其背后的脑机制有了进一步的认识，相应的研究成果可有助于教学者针对性地改善教学活动并提升教学效果。

4.1 筛选教学材料

在多媒体普及的今天，在课堂上使用视听材料进行辅助教学已成为常态。在课程的介绍阶段，引入视听材料作来激发学生的兴趣是一个实用的方法 (Grant & Thornton, 2007; Kay, 2007)，而选择合适的材料则显得至关重要。利用人际神经科学的方法，以学生群体脑间活动情况为指标，对视听材料的特性进行筛选，比起传统的主观判断更为客观。比如，以观看视频时的大脑活动相关性脑同步为指标，研究发现相比于"价值导向（有用的）的材料，兴趣导向（有趣的）的材料更能激发学生的学习动机(Zhu et al., 2019)，而相比于不连贯的材料，连贯性好的材料能让学生印象更深刻(Poulsen et al., 2017)。在课程进行中，也可以适度引入视听材料，因为相对于教师单纯的讲解，内容形式丰富的视听材料更能吸引学生的注意，能让学生更好地记住视频中的信息。并且，教师对视听材料的讲解也可能促进学生对视听材料的理解(Bevilacqua et al., 2018)。但是，如果只是播放教师授课的录播视频，教学效果却不如教师当面讲授好(Liu et al., 2019)。这些研究都将更好地帮助教师筛选合适的教学材料，以优化教学。

4.2 改善师生关系

良好师生关系对学生的课堂投入度和学习效果有正向影响，师生亲密度与学生的测验成绩有直接相关(Bevilacqua et al., 2018)。虽然，师生脑同步与学生的学习成绩的关系存在争议，一些研究认为师生间的脑同步可以初步预测知识是否成功转移 (Holper et al., 2013; Takeuchi et al., 2016; Davidesco et al., 2019; Zheng et al., 2018)，Bevilacqua 等人(2018)和 Nozawa 等人(2019)研究则表明二者之间没有直接的关系。但是，师生及生生脑间同步都可以预测学生在教学过程中的投入度(Dikker et al., 2017; Bevilacqua et al., 2018)，与老师关系更亲密的学生的师生脑间同步程度也更高(Bevilacqua et al., 2019)。而脑间同步可能是注意投入的一个指标

(Dikker et al., 2017)。这表明，在神经层面，良好的师生关系对学生课堂投入度及学习成绩的正向影响可能是通过增强师生脑间同步来实现的。虽然师生间的融洽关系的正面影响，可能不能在一次教学后就体现出来，但仍然有可能通过促进学生持有更好的学习态度，从而在长期内导致更好的学习结果(Nozawa et al., 2019)。鉴于良好师生关系对教学效果的正向影响，教师需要营造良好的师生关系。而通过人际神经科学的研究方法，研究者不仅在神经层面肯定了师生关系的重要性，并且发现互动可以通过增强师生的脑间同步来促进师生关系的融洽(Zheng et al., 2020)。借鉴这些结论，教师可以在教学中增加一些互动的活动，例如课前简单的身体同步游戏(Nozawa et al., 2019)，上课时进行问答互动(Zheng et al., 2020)都可以提升师生亲密度，让学生可以更加投入到课程中去，带来更好的教学效果。

4.3 适当互动

教学是一个动态的社会互动过程，无论教学形式如何，互动是最有效的学习环境的核心，在互动过程中，教师和学生之间的积极交流促进了信息的不断传递和反馈(Watanabe et al., 2013)，往往有助于激发学生的学习动机(Paechter & Maier, 2010)，促进师生关系的(Zheng et al., 2020)，提升教学效果(Holper et al., 2013, Liu et al., 2019; Pan et al., 2018)。通过人际神经科学的研究方法，研究者发现了互动对教学的积极促进作用的脑机制之一，即增加师生间的脑间同步。例如，上课前，师生即便只是在上课前进行了简单的身体动作同步，也可以促进课程中师生的脑同步和提升亲密度(Nozawa et al., 2019)。课程进行中，即便是师生间的非语言信息的互动也可以为教学提供反馈(liu et al., 2019)，因此，教师上课时应该尽量面向学生，利用非语言信息与学生进行互动，例如微笑以示鼓励，沉默以示严肃。此外，不同的语言互动形式产生的教学效果也存在差异。相比于整体教学，部分教学的互动数量更多，教学效果也更好(Pan et al., 2018)。与解释教学策略相比，指导式教学策略的互动更能激发学生的主动思考(Pan et al., 2020)。教师可以将课堂分成几个部分，并且适当安排指导性的互动，例如出现难题时给予解决问题的线索，而不是直接给出解答过程，以提升教学效果。

5 总结和展望

人际神经科学是一个新兴的神经科学研究视角，相比于传统的单脑研究，它在全面了解教学过程动态及评估教学质量方面的优势的主要体现在以下三点：一是更高的信噪比。个体脑内活动同步受与任务无关的内部固有的神经活动和神经伪迹(如眼动和运动伪迹)的影响，它们在个体大脑内部是一致的，但在脑间却是不一致的(Davidesco et al., 2019)。二是脑间活

动的配对可能对个体间正在发生的社会互动可能更敏感，因为它同时考虑了所有互动主体的神经活动动态变化，不仅可以进行师生配对，还可以进行生生配对(Bevilacqua et al., 2018; Dikker et al., 2017)，提供通过分析个体内大脑活动无法得出的结论，例如预测对知识的长时记忆(Davidesco et al., 2019)，区分不同的教学策略(Pan et al., 2020)。三是有效信号的获得可以不经过刺激的简单大量重复。这让人际神经科学技术在在教育研究中增强教学实验的互动性和提高生态效度方面具有巨大的潜力，本文综述的大部分研究设计比较接近真实的课堂教学(见 Bevilacqua et al., 2018; Dikker et al., 2017)。与此同时，研究者也必须认识到这种技术本身存在的局限性，例如多台设备间的信号同步问题(郑丽莉 等, 2015)、现有设备与数据采集技术下尚无法完全实现对自然情境下社会互动的研究等(李先春, 卑力添 等, 2018)。但是，相信随着技术的进步，实验范式的不断完善，这种人际神经科学的方法在教育研究中一定会有更广泛的应用。

第一，应用于学习能力水平不同的学生的研究中。目前的研究对象多为智力正常的高中生、大学生，已有的研究为教学提升提供了有价值的参考建议，而诸如认知障碍学生、学习困难者等特殊人群的在教育过程中的行为与脑活动特点还没有得到充分的研究，例如他们的脑间活动特点是否有异于正常学生，利用人际神经科学方法不同于单脑研究方法的关注重点，未来人际神经神经科学的方法可用于提升学习困难人群的教学提升，例如应用该方法区分和识别学习困难者，及时为他们提供帮助。第二，应用于技能教学的评估中。近年来便携式 EEG 及 fNIRS 快速发展，已经研制出质量轻巧的设备，比如 fNIRS 传感器成本相对较低，甚至可以内置于无线便携式电池供电系统，对运动的容忍性也比较好，这让考察动作技能类的教学成为可能。第三，应用于在线教育课程教学追踪、教学程质量评估。线下课程的教学方法是否同样适用于线上课程？如何才能使学生在缺乏教师监督的情况下依然保持对课程的高投入度？根据目前应用人际神经科学方法在教育领域的得出的成果，我们知道，脑间活动关联可以作为注意投入及学习效果的预测指标，未来的研究可以尝试将人际神经科学的方法应用于追踪学生在在线课程学习中的投入度的动态变化，以及时发现课程的不足之处进行调整，提高在线课程的完成率。以及应用于在线教育课程质量的评估，提供更优质的课程。

参考文献

霍鹏飞，吴玮. (2011). 大脑的学习机制及其对教育的启示. *集美大学学报,* (02), 50–53.

李先春. (2018). *超扫描技术与社会认知.* 上海:华东师范大学出版社.

李先春，卑力添，袁涤，丁雅娜，冯丹阳. (2018). 超扫描视角下的社会互动脑机制. *心理科学, 41*(06), 206–213.

乔新虹，杨文伟，李先春， 裴新宁. (2018). 超扫描技术在社会性学习中的应用. *现代教育技术. 28*(09), 12–18.

郑丽莉，成晓君，胡谊，李先春. (2015). 超扫描的发展及其在教育领域的应用潜力. *教育生物学杂志, 3*(001), 35–42.

Anderson, J. R. (1981). Effects of prior knowledge on memory for new information. *Memory & Cognition. 9*(3), 237–246.

Anders, S., Heinzle, J., Weiskopf, N., Ethofer, T., & Haynes, J. D. (2011). Flow of affective information between communicating brains. *NeuroImage, 54*(1), 439–446.

Antonenko, P., Paas, F., Grabner, R., & van Gog, T. (2010). Using electroencephalography to measure cognitive load. *Educational Psychology Review, 22*(4), 425–438.

Astin, A.W. (1996). Involvement in learning revisited: Lessons we have learned. *Journal of College Student Development, 37*(2), 123–134.

Babiker, A., Faye, I., Mumtaz, W., Malik, A. S., & Sato, H. (2019). EEG in classroom: EMD features to detect situational interest of students during learning. *Multimedia Tools and Applications,78*(12), 16261–16281.

Baccala, L.A. &Sameshima, K. (2001). Partial directed coherence:a new concept in neural structure determination. *Biological Cybernetics, 84*(6), 463–474.

Bevilacqua, D., Davidesco, I., Wan, L., Chaloner, K., Rowland, J., Ding, M., . . . Dikker, S. (2018). Brain-to-Brain Synchrony and learning outcomes vary by student-teacher dynamics: Evidence from a real-world classroom electroencephalography study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 31*(3), 01–11.

Burgess, A. P. (2013). On the interpretation of synchronization in EEG hyperscanning studies: A cautionary note. *Frontiers in human neuroscience, 7*, 881.

Chi, M. T. H., Siler, S. A., & Jeong, H.(2004). Can tutors monitor students' understanding accurately?. *Cognition & Instruction, 22*(3), 363–387.

Cohen, S. S., Madsen, J., Touchan, G., Robles, D., Lima, S. F. A., Henin, S., & Parra, L. C. (2018). Neural engagement with online educational videos predicts learning performance for individual students. *Neurobiology of Learning Memory, 155*, 60–64.

Dahlstrom-Hakki, I., Asbell-Clarke, J., & Rowe, E. (2019). Showing is knowing: The potential and challenges of using neurocognitive measures of implicit learning in the classroom. *Mind Brain and Education, 13*(1), 30–40.

Davidesco, I., Laurent, E., Valk, H., West, T., Dikker, S., Milne, C., & Poeppel, D. (2019). Brain-to-brain synchrony predicts long-term memory retention more accurately than individual brain measures. Retrieved January 9, 2021, from https://doi.org/10.1101/644047

Dikker, S., Wan, L., Davidesco, I., Kaggen, L., Oostrik, M., McClintock, J., . . . Poeppel, D. (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group Interactions in the classroom. *Current Biology, 27*(9), 1375–1380.

Dmochowski, J. P., Sajda, P., Dias, J. & Parra, L. C. (2012). Correlated components of ongoing EEG point to emotionally laden attention - a possible marker of engagement?. *Frontiers in Human Neuroscience, 6*, 112.

Dmochowski, J. P., Bezdek, M. A., Abelson, B. P., Johnson, J. S., Schumacher, E. H., & Parra, L. C. (2014). Audience preferences are predicted by temporal reliability of neural processing. *Nature Communications, 5*, 4567.

Frymier, A. B., & Houser, M. L. (2000). The teacher‐student relationship as an interpersonal relationship. *Communication Education, 49*(3), 207–219.

Furnham, A., & Chamorro-Premuzic, T. (2005). Individual differences in students' preferences for lecturers' personalities. *Journal of Individual Differences, 26*(4), 176–184.

Granger, C. W. J. (1969). Investigating causal relation by econometric and cross-sectional method. *Econometrica, 37*(3), 424–438.

Gilbert, A. C., Boucher, V. J., & Jemel, B. (2014). Perceptual chunking and its effect on memory in speech processing: ERP and behavioral evidence. *Frontiers in Psychology ,5*, 220.

Grant, M. R., Thornton, H. R . (2007). Best practices in undergraduate adult-centered online learning: Mechanisms for course design and delivery. *Journal of Online Learning and Teaching, 3*, 346–356.

Holper, L., Goldin, A. P. , Shalóm, Diego E., Battro, A. M., Wolf, M., & Sigman, M. (2013). The teaching and the learning brain: A cortical hemodynamic marker of teacher–student interactions in the socratic dialog. *International Journal of Educational Research, 59*, 1–10.

Holper, L., Scholkmann, F., & Wolf, M. (2012). Between-brain connectivity during imitation measured by fNIRS. *NeuroImage, 63,* 212–222.

Jahng, J., Kralik, J. D., Hwang, D. U., & Jeong, J. (2017). Neural dynamics of two players when using nonverbal cues to gauge intentions to cooperate during the prisoner's dilemma game. *Neuroimage, 36*(10), 3092–3101.

Jiang, J., Chen, C. S., Dai, B. H., Shi, G., Ding, G. S., Liu, L., & Lu, C. M. (2015). Leader emergence through interpersonal neural synchronization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,112,* 4274–4279.

Kay, R. H. (2007). Exploring the use of video podcasts in education: A comprehensive review of the literature. *Computers in Human Behavior, 23*(3), 820–831.

Khader, P. H., & Rösler, F. (2011). EEG power changes reflect distinct mechanisms during long-term memory retrieval. *Psychophysiology*, *48*(3), 362–369.

Ko, L. W., Komarov, O., Hairston, W. D., Jung, T. P., & Lin, C. T. (2017). Sustained attention in real classroom Settings: An EEG Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, *11*, 388.

Konvalinka, I., & Roepstorff, A. (2012). The two-brain approach: How can mutually interacting brains teach us something about social interaction?. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*, 215.

Lachaux, J.P., Rodriguez, E., Martinerie, J., & Varela, F. J.(1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping, 8*(4), 194–208.

Leinhardt, G., & Steele, M. (2005). Seeing the complexity of standing to the side: Instructional dialogues. *Cognition and Instruction, 23*(1), 87–163.

Liu, J., Zhang, R., Geng, B., Zhang, T., Yuan, D., Otani, S., & Li, X. (2019). Interplay between prior knowledge and communication mode on teaching effectiveness: Interpersonal neural synchronization as a neural marker. *Neuroimage*, *193*, 93–102.

Liu, N., Mok, C., Witt, E. E., Pradhan, A. H., Chen, J. E., & Reiss, A. L. (2016). NIRS-based hyperscanning reveals inter-brain neural synchronization during cooperative Jenga game with face-to-face communication. *Frontiers in Human Neuroscience, 10*, 82.

Miller, A. N., Katt, J. A., Brown, T., & Sivo, S. A. (2014). The relationship of instructor Self-Disclosure, Nonverbal immediacy, And credibility to student incivility in the college classroom. *Communication Education, 63*(1), 1–16.

Nozawa, T., Sakaki, K., Ikeda, S., Jeong, H., Yamazaki, S., Kawata, K., . . . Kawashima, R. (2019). Prior physical synchrony enhances rapport and inter-brain synchronization during subsequent educational communication. *Scientific Reports , 9*(1), 12747.

Paechter, M., & Maier, B. (2010). Online or face-to-face? Students' experiences and preferences in e-learning. *Internet & Higher Education, 13*(4), 292–297.

Pan, Y. F., Cheng, X. J., Zhang, Z. X., Li, X. C., & Hu, Y. (2017). Cooperation in lovers: An fNIRS-based hyperscanning study. *Human Brain Mapping, 38,* 831–841.

Pan, Y., Dikker, S., Goldstein, P., Zhu, Y., Yang, C., & Hu, Y. (2020). Instructor-learner brain coupling discriminates between instructional approaches and predicts learning. *Neuroimage*, *211*, 116657.

Pan, Y., Novembre, G., Song, B., Li, X., & Hu, Y. (2018). Interpersonal synchronization of inferior frontal cortices tracks social interactive learning of a song. *Neuroimage, 183*, 280–290.

Poulsen, A. T., Kamronn, S., Dmochowski, J., Parra, L. C., & Hansen, L. K. (2017). EEG in the classroom: Synchronised neural recordings during video presentation. *Scientific Reports, 7*, 43916.

Ruge, H., & Wolfensteller, U. (2009). Rapid formation of pragmatic rule representations in the human brain during instruction-based learning. *Cerebral Cortex, 20*(7), 1656–1667.

Schilbach, L., Timmermans, B., Reddy, V., Costall, A., Bente, G., Schlicht, T., & Vogeley, K. (2013). Toward a second-person neuroscience. *Behavioral and Brain Sciences,36*, 393–414.

Schippers, M. B., Roebroeck, A., Renken, R., Nanetti, L., & Keysers, C. (2010). Mapping the information flow from one brain to another during gestural communication. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *107*(20), 9388–9393.

Sun, B., Xiao, W., Feng, X., Shao, Y., Zhang, W., & Li, W. (2020). Behavioral and brain synchronization differences between expert and novice teachers when collaborating with students. *Brain and Cognition*, *139*, 105513.

Takeuchi, N., Mori, T., Suzukamo, Y., & Izumi, S. I. (2017). Integration of teaching processes and learning assessment in the Prefrontal Cortex during a video game teaching-learning task. *Frontiers in Psychology*, *7*, 2052.

Toppi, J., Borghini, G., Petti, M., He, E. J., De Giusti, V., He, B., Astolfi, L., & Babiloni, F. (2016). Investigating cooperative behavior in ecological settings: An EEG hyperscanning study. *Plos One*, *11*(4), e0154236.

Torrence, C., & Compo, G. P. (1997). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *79*(1), 61–78.

Watanabe, S., Hara, K., Ohta, K., Iino, H., Miyajima, M., Matsuda, A., Hara, M., Maehara, T., Matsuura, M., Matsushima, E., (2013). Aroma helps to preserve information processing resources of the brain in healthy subjects but not in temporallobe epilepsy. *Szure the Journal of the British Epilepsy Association, 22*(1), 59–63.

Wazny, J. H., & Nathan-Roberts, D. (2018). Real-time cognitive-state neuroimaging in applied education. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 62*(1), 1157–1161.

Yasuyo, M., Mingdi, X., & Satoshi, M. (2018). Toward interactive social neuroscience: Neuroimaging real-world interactions in various populations. *Japanese Psychological Research, 60*(4),196–224.

Zheng, L. F., Chen, C. S., Liu, W. D., Long, Y. H., Zhao, H., Bai, X. L., . . . Lu, C. M. (2018). Enhancement of teaching outcome through neural prediction of the students' knowledge state. *Human Brain Mapping, 39*(7), 3046–3057.

Zheng, L., Liu, W., Long, Y., Zhai, Y., Zhao, H., Bai, X., Zhou, S., Li, K., Zhang, H., Liu, L., Guo, T., Ding, G., & Lu, C. (2020). Affiliative bonding between teachers and students through interpersonal synchronisation in brain activity. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, *15*(1), 97–109.

Zhu, Y., Pan, Y. F., & Hu, Y. (2019). Learning desire is predicted by similar neural processing of naturalistic educational materials. *eNeuro*, *6*(5), ENEURO.0083-19.2019.

The teaching and learning brains : Interpersonal neuroscience in educational research

CHENG Xiaojun[1], LIU Meihuan[1], PAN Yafeng[2], LI Hong[1*]

1 School of Psychology, Shenzhen University, Shenzhen, China,

2 Department of Clinical Neuroscience, Karolinska Institutet, Stockholm, Sweden

Abstract One significant challenge that currently limits the development of educational neuroscience is the way to neurophysiologically characterize interpersonal interactions and dynamics of pedagogical activities. Our paper examined how “interpersonal neuroscience” (i.e., the measurement of two or more individuals’ brain activity and the analysis of their inter-dependency) might provide novel insights into the neural mechanisms of pedagogical interactions. To this end, we reviewed recent research focusing on the application of interpersonal neuroscientific approaches in the context of education. In particular, we discussed how the rapidly developing field of interpersonal neuroscience could contribute to the monitoring of pedagogical processes, prediction of pedagogical efficiency, and identification of influencing factors of teaching and learning. Finally, we discussed the methodological and translational challenges surrounding the application of interpersonal neuroscientific approaches in education, as well as prospects for future studies.

Keywords Interpersonal neuroscience, Education, Hyperscanning, Interpersonal brain synchronization, Inter-subject correlation